플렉서블 실리콘 박막 태양전지용 ZnO:Al/Ag 후면반사막의 표면형상에 따른 광산란 특성 변화

백상훈*** · 이정철* · 박상현* · 송진수* · 윤경훈* · 왕진석** · 이희덕** · 조준식†

*한국에너지기술연구원 태양광연구단, **충남대학교, 전자전파정보통신공학과

Effect of Surface Morphology in ZnO:Al/Ag Back Reflectors for Flexible Silicon Thin Film Solar Cells on Light Scattering Properties

Sang Hun Baek***, Jeong Chul Lee*, Sang-Hyun Park*, Jinsoo Song*, Kyung Hoon Yoon*,
Jin-Suk Wang**, Hi-Deok Lee** and Jun-Sik Cho*†

*Photovoltaic Research Center, Korea Institute of Energy Research, 71-2 Jang-dong,
Yuseong-gu, Deajeon, 305-343, Korea

**Dept. Electronics Engineering, Chungnam National University, 79 Daehangno,
Yuseong-gu, Deajeon, 305-764, Korea

(2010년 8월 30일 접수 : 2010년 9월 16일 최종수정 : 2010년 9월 17일 채택)

Abstract Changes in surface morphology and roughness of dc sputtered ZnO:Al/Ag back reflectors by varying the deposition temperature and their influence on the performance of flexible silicon thin film solar cells were systematically investigated. By increasing the deposition temperature from 25°C to 500°C, the grain size of Ag thin films increased from 100 nm to 1000 nm and the grain size distribution became irregular, which resulted in an increment of surface roughness from 6.6 nm to 46.6 nm. Even after the 100 nm thick ZnO:Al film deposition, the surface morphology and roughness of the ZnO:Al/Ag double structured back reflectors were the same as those of the Ag layers, meaning that the ZnO:Al films were deposited conformally on the Ag films without unnecessary changes in the surface features. The diffused reflectance of the back reflectors improved significantly with the increasing grain size and surface roughness of the Ag films, and in particular, an enhanced diffused reflectance in the long wavelength over 800 nm was observed in the Ag back reflectors deposited at 500°C, which had an irregular grain size distribution of 200-1000 nm and large surface roughness. The improved light scattering properties on the rough ZnO:Al/Ag back reflector surfaces led to an increase of light trapping in the solar cells, and this resulted in a noticeable improvement in the J_{sc} values from 9.94 mA/cm² for the flat Ag back reflector at 25°C to 13.36 mA/cm² for the rough one at 500°C. A conversion efficiency of 7.60% (V_{oc} = 0.93, J_{sc} = 13.36 mA/cm², FF = 61%) was achieved in the flexible silicon thin film solar cells at this moment.

Key words back reflector, flexible thin film solar cell, silicon thin film, light trapping, reflectance.

1. 서 론

태양광 발전의 grid parity 조기 달성 및 보급 확대를 위해서는 저가, 고효율의 태양전지 기술개발이 절실하며 이를 위하여 현재 태양전지 시장의 대부분을 점유하고 있는 결정질 실리콘 태양전지를 대체할 차세대 태양전지 기술이 활발히 개발되고 있다. 이 중 광흡수층을 실리콘 박막으로 사용하고 유연성을 갖는 금속 또는 플라스틱 기판을 사용한 플렉서블 실리콘 박막 태양전지가 태양전

지 저가화의 가장 유망한 태양전지 기술 중의 하나로 인식되고 있으며 전 세계적으로 활발한 기술개발이 진행되고 있다.^{1,2)} 재료적인 측면에서 실리콘은 지구상에 가장 흔한 재료인 동시에 독성이 없어 재료 수급, 공정 및 환경에 대한 문제가 없다. 또한 유리기관 대신 플렉서블 기판을 사용하는 경우 유연한 동시에 깨지지 않으며 값싸고 이동 및 설치가 용이한 장점을 갖고 있어 적용성과 활용성이 상당히 우수하며 특히 Building integrated PV (BIPV)와 같은 건물 적용에 유리하다.³⁾ 또한 롤투롤 공정을 이용한 대량생산이 가능하기 때문에 유리기관을 사용하는 박막 태양전지에 비하여 획기적으로 가격을 저감할 수 있을 것으로 기대되고 있다.⁴⁾ 그러나 실리콘 박막

†Corresponding author
E-Mail : jscho@kier.re.kr (J. -S. Cho)

광흡수층은 Cu(InGa)Se₂이나 CdTe 박막에 비하여 광 흡수율이 상대적으로 낮기 때문에 광 흡수율의 향상과 이를 통한 태양전지 성능 향상을 위해서는 광 포획(light trapping) 기술이 필요하다.⁵⁻⁶⁾ 일반적으로 실리콘 박막 태양전지의 광 포획 향상은 태양전지 내로 입사된 광의 진행경로 및 산란각을 늘려줌으로써 이루어지며 이를 위해서는 태양전지 구조에 따라 투명한 유리기판을 사용하는 superstrate 형태의 pin 구조에서는 전면전극의 입사광 산란 특성을, 그리고 플렉서블 기판을 사용하는 substrate 형태의 nip 구조에서는 후면반사막의 반사광 산란 특성을 향상시킴으로써 이루어진다. 플렉서블 실리콘 박막 태양전지의 후면반사막에 대한 광 특성을 향상시키기 위한 다양한 기술이 개발되고 있으며 가장 대표적인 것이 후면 반사막의 표면 텍스처링을 통하여 입사광의 반사 산란도를 증가시키는 것이다.⁷⁻⁹⁾

본 연구에서는 DC 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 ZnO:Al/Ag 이중구조의 후면반사막을 제조하였다. 증착변수에 따른 Ag 박막의 표면형상 및 표면거칠기 변화를 통하여 후면반사막의 표면 텍스처링을 제어하고 이에 따른 후면반사막의 광학적 특성을 조사하였다. 또한 서로 다른 표면형상 및 표면거칠기 특성을 갖는 후면반사막 위에 비정질 실리콘 박막 태양전지를 제조함으로써 후면반사막의 텍스처링 특성이 태양전지 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

플렉서블 실리콘 박막 태양전지용 ZnO:Al/Ag 이중구조 후면반사막은 100 μ m 두께의 플렉서블 스테인레스 스틸 기판 위에 4 inch-Ag 금속 타겟과 2wt% Al₂O₃를 함유한 ZnO 타겟을 이용하여 DC 마그네트론 스퍼터링법으로 증착하였다. 저진공과 고진공 펌프를 이용하여 5×10^{-6} torr 이하로 증착 전 진공도를 유지하였다. 스퍼터링 가스로는 초고순도 Ar 가스 (99.999%)를 사용하고 일정량의 가스를 Mass Flow Meter (MFC)를 통하여 주입하고 고진공 펌프 앞단에 설치된 스로틀 밸브를 이용하여 증착압력을 공정 중에 일정하게 유지하였다. 기판과 스퍼터링 타겟은 100 mm의 간격을 유지하고 증착파워는 2.5 mW/cm²로 고정하였다. 후면반사막과 스테인레스 스틸 기판간의 접착력을 확보하기 위하여 후면반사막 증착 전에 Cr 박막을 30 nm 두께로 증착하였다. 증착온도를 상온에서 500°C까지 변화시키며 Ag 후면반사막의 표면형상 및 표면거칠기의 변화를 분석하였다. Ag 후면반사막의 실리콘 박막내로의 확산방지 및 반사도 향상을 위하여 100 nm 두께의 ZnO:Al 박막을 Ag 후면반사막 위에 상온에서 증착하였다. 증착 조건에 따라 제조된 후면반사막의 미세구조 및 표면거칠

기는 SEM (scanning electron microscope)와 AFM (atomic force microscopy) 분석을 이용하여 관찰하였다. Uv-visible-nIR spectrometer를 이용하여 350 nm - 1100 nm 파장영역에서 후면반사막의 총 반사도 (total reflectance)와 확산 반사도 (diffused reflectance)를 측정하고 이로부터 반사에 의한 헤이즈 (haze)값을 계산하였다.

후면반사막의 표면형상 및 표면거칠기에 따른 산란특성이 실리콘 박막 태양전지의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 제조된 후면반사막 위에 nip구조를 갖는 비정질 실리콘 박막 태양전지를 다실 플라즈마 화학기상증착장비(multi-chamber plasma enhanced chemical vapor deposition system)를 이용하여 제작하였다. Fig. 1은 ZnO:Al/Ag 후면반사막 위에 제조된 플렉서블 비정질 실리콘 박막 태양전지의 단면구조를 나타낸 SEM 사진이다. p, n 층과 intrinsic 층은 13.56 MHz radio frequency (RF)와 60MHz very high frequency (VHF) 글로우 방전을 사용하여 각각 증착하였으며 실리콘 박막 증착을 위하여 SiH₄와 H₂ 혼합가스를 사용하고 B₂H₆와 PH₃ 가스를 p와 n층의 도핑가스로 사용하였다. 후면반사막 위에 실리콘 박막 층을 증착한 뒤 indium tin oxide (ITO) 박막을 상부전극 및 반사방지막으로 증착하였다. ITO 상부전극은 금속 마스크를 통하여 0.25 cm²의 정사각형 형태로 증착하였으며 이를 통하여 태양전지 소자의 면적을 정의하였다. 제작된 플렉서블 실리콘 박막 태양전지의 성능평가는 Class AAA 등급의 솔라시뮬레이터를 통하여 Photo I-V를 측정함으로써 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 100 μ m 두께의 플렉서블 스테인레스 스틸 기판위에 증착온도를 25°C에서 500°C까지 변화시키며 제조된 300 nm 두께의 Ag 후면반사막 표면형상 변화를 나타

Fig. 1. Cross-sectional SEM image of flexible amorphous silicon thin film solar cell with the ZnO:Al/Ag back reflector.

Fig. 2. Changes in surface morphology of Ag back reflectors deposited by varying the deposition temperature. (a) 25°C, (b) 100°C, (c) 300°C and (d) 500°C.

낸 SEM 사진결과이다. Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 기판을 가열하지 않고 제조된 Ag 박막의 경우는 약 200 nm 이하의 작은 입자가 균일하게 분포되어 있는 표면형상을 보여준다. 증착온도를 100°C로 증가시킨 경우는 입자크기의 미세한 증가를 제외하고는 입자 분포의 균일성은 기판 가열 전과 거의 동일한 경향을 보여준다. 증착온도가 300°C로 증가하는 경우 Ag 박막내의 입자 성장이 뚜렷하게 나타나며 입자크기는 약 400 nm 정도로 증가된다. 그러나 입자크기는 증가한 반면 입자크기의 분포는 여전히 균일한 것으로 관찰된다. 증착온도가 500°C까지 증가하는 경우 Fig. 2(d)에서 보는 바와 같이 증착된 Ag 입자 일부의 크기가 급격히 증가하여 약 1000 nm까지 성장하며 이에 따라 입자크기의 불균일성이 증대되는 것을 알 수 있다. 증착온도에 따라 제조된 Ag 박막의 제곱 평균 표면 거칠기(root mean square surface roughness; σ_{rms})를 AFM 분석을 통하여 측정한 경우 증착온도 증가에 따른 Ag 입자의 성장 및 표면형상 변화와 더불어 σ_{rms} 값도 함께 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 3). 기판을 가열하지 않고 제조된 Ag 박막의 σ_{rms} 값은 약 6.6 nm 정도로 상당히 평탄한 것을 알 수 있으며 증착온도 100°C의 Ag 박막도 유사한 σ_{rms} 값을 갖는다. 반면에 증착온도 300°C에서 제조된 Ag 박막의 σ_{rms} 값은 25.6 nm로 증가되며 500°C의 경우는 46.6 nm까지 증가된다. 이러한 결과는 Fig. 2의 SEM 사진결과에서 관찰되는 Ag 박막의 표면형상 변화와도 잘 일치함을 알 수 있다. 물리기상증착법(physical Vapor Deposition;

Fig. 3. Root mean square (rms) surface roughness of Ag and ZnO:Al/Ag back reflectors at different deposition temperatures.

PVD)으로 제조된 다양한 순수 금속들의 미세구조 변화는 Structure Zone Model (SZM)을 통하여 잘 설명되어지고 있다.¹⁰⁻¹³⁾ SZM에서는 순수 금속의 미세구조 변화를 증

착변수에 따라 각 영역(zone)별로 구별하여 설명하고 있다. I. Petrov 등은 순수 금속의 미세구조 변화를 증착변수 중 증착온도에 따라 Zone I, Zone T, Zone II의 세 영역으로 구분하여 설명하였으며 각 영역은 그 물질의 녹는점(melting point; T_m)과 기판온도(substrate temperature; T_s)의 비인 T_s/T_m 을 기준으로 구분하였다.¹⁴⁾ Zone I 영역은 증착원자의 표면확산(adatom diffusion)이 무시될 정도의 낮은 온도 영역을 의미하며 Zone T는 표면확산이 우세한 영역, 그리고 Zone II는 표면 및 벌크 확산이 우세한 영역을 각각 나타낸다. Zone I 영역에서는 증착원자의 표면이동도가 매우 낮아 박막은 작은 입자로 구성되거나 비정질 형태를 나타낸다. 반면 높은 증착온도 영역인 Zone T에서는 박막 성장 동안에 입자경계(grain boundary)는 움직이지 않는 반면 큰 비표면적을 갖는 작은 입자들의 병합(coalescence)을 통하여 입자성장이 이루어진다. 또한 이러한 입자의 성장은 박막 두께에 따라 표면형상 및 거칠기의 변화를 수반하며 박막 두께가 증가함에 따라 표면 거칠기도 증가하는 것으로 알려져 있다. 더 높은 증착온도 영역(Zone II)에서는 벌크 확산이 우세하여 입자들의 병합과 동시에 입자경계(grain boundary)의 이동이 발생하며 이차 재결정화(secondary recrystallization)가 일어난다. 이를 통하여 주상구조(columnar structure)의 입자들이 형성되고 평탄한 표면이 형성된다. I. Petrov 등은 Zone T에 해당하는 T_s/T_m 은 약 0.4 - 0.5 정도인 것으로 보고하고 있다. 증착온도 500°C에서의 Ag 금속의 T_s/T_m 은 약 0.5 정도 (Ag 금속의 T_m : 961°C)로 SZM의 Zone T에 해당한다. 따라서 Fig. 2(d)에서 관찰되는 Ag 박막의 급격한 입자 성장 및 입자크기의 불균일성은 증착입자의 병합을 통한 입자의 성장에 기인하며 이에 따라 Ag 박

막의 표면거칠기도 함께 증가하는 것을 알 수 있다.

Ag 박막을 실리콘 박막 태양전지의 후면반사막으로 사용하기 위해서는 일반적으로 ZnO:Al 박막을 그 위에 증착한 ZnO:Al/Ag 이중구조 후면반사막을 제조한다. Ag 후면반사막 위에 증착된 ZnO:Al 박막은 확산 방지막으로써 실리콘 박막과 Ag 박막이 반응하여 생성될 수 있는 실리사이드(silicide) 층의 형성을 억제함으로써 후면반사막의 반사특성이 감소하는 것을 방지하는 동시에 약 320 - 350 nm 영역에서 Ag의 표면 및 벌크 플라즈몬(surface and bulk plasmon) 현상에 의하여 발생하는 흡수를 감소시켜 주는 것으로 알려져 있다.^{15,16)} 본 연구에서는 100 nm 두께의 ZnO:Al 박막을 부가적인 기판 가열을 하지 않고 상온에서 증착함으로써 ZnO:Al 박막 증착 조건에 따른 Ag 박막의 변화를 최소화하였다. ZnO:Al/Ag 후면반사막의 표면형상은 Fig. 2의 Ag 박막의 표면형상과 매우 유사하게 나타났으며 Fig. 3에서 보는 바와 같이 ZnO:Al/Ag 후면반사막의 σ_{rms} 값은 증착온도가 상온에서 500°C로 증가함에 따라 약 7.1 nm에서 39.3 nm까지 증가하며 이는 Ag 후면반사막의 σ_{rms} 값과 큰 차이가 없다. 이러한 결과로부터 ZnO:Al 박막이 Ag 후면반사막의 표면형상을 따라 균일하게 증착되었음을 알 수 있다.

앞의 SEM 및 AFM 분석결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 증착온도를 증가시킴에 따라 Ag 후면반사막의 입자 성장이 발생하고 이를 통하여 표면 형상 및 표면거칠기가 변화됨을 알 수 있다. 이러한 표면형상 및 표면거칠기의 변화가 Ag 후면반사막의 반사특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 총 반사도(total reflection) 및 확산 반사도(diffused reflection)를 측정하여 Fig. 4(a)에 나타내었다. Ag 후면반사막의 총 반사도는 증착온도 변화

Fig. 4. Total and diffused reflectance (a) and haze (b) of the Ag back reflectors deposited at different deposition temperatures.

에 따라 큰 차이를 보이지 않으며 400 - 1100 nm의 파장 영역에서 약 90% 내외의 반사도 값을 나타낸다. 확산 반사도의 경우는 상온 및 증착온도 100°C에서는 약 55% 이하의 유사한 값을 나타내는 반면 증착온도가 300°C로 증가하는 경우는 400 - 750 nm 파장 영역에서 다소 증가하나 그 이상의 파장영역에서는 낮은 증착온도에서 제조된 시료들과 동일한 값을 나타낸다. 그러나 증착온도를 500°C까지 증가시켜 제조된 Ag 후면반사막의 경우는 다른 낮은 증착온도에서 제조된 Ag 박막들에 비하여 전 파장 영역에서 확산 반사도가 크게 증가되며 특히 800 nm 이상의 장파장 영역에서도 확산 반사도가 향상되는 특성을 나타낸다. 후면반사막 위에서 반사된 빛의 산란특성은 확산 반사도와 총 반사도의 비인 Haze값으로 표시될 수 있다.

$$\text{Haze (H}_R) = \frac{\text{Diffused reflectance}(R_D)}{\text{Total reflectance}(R_T)} \quad (1)$$

Fig. 4(b)는 앞서 측정된 총 반사도 및 확산 반사도로부터 계산된 대표적인 파장값(400, 650, 1000 nm)에 대한 Haze값의 변화를 나타낸 것이다. 단파장 영역인 400 nm 파장에서의 Ag 후면반사막의 Haze값은 증착온도가 증가할수록 크게 증가함을 알 수 있다. 가시광 영역인 650 nm 파장에서도 증착온도에 따라 점차로 증가된다. 그러나 1000 nm의 장파장에서는 증착온도 300°C까지도 Haze값은 55%정도로 거의 변화하지 않다가 증착온도 500°C에서 약 63%까지 증가함을 알 수 있다. 일반적으로 텍스처링된 표면에서의 빛의 산란(Light scattering)은 텍스처의 크기와 유효파장(effective wavelength)이 일치하는 경우에 발생하는 것으로 알려져 있다.¹⁷⁾ SEM 및 AFM 분석결과에

서 보는 바와 같이 상온과 100°C의 증착온도에서는 Ag 박막의 입자크기 및 표면거칠기 변화가 거의 일어나지 않으며 이에 따라 반사특성도 거의 동일한 것으로 나타난다. 증착온도 300°C의 경우는 균일한 입자 성장을 통하여 상대적으로 낮은 증착조건에 비하여 입자크기 및 표면거칠기가 증가되고 이에 따라 가시광 영역까지의 반사특성이 향상된다. 그러나 이러한 표면형상 변화는 장파장의 산란 특성을 향상시키기에는 작은 수준의 변화로 보인다. 반면 증착온도 500°C의 Ag 박막은 입자크기 및 σ_{rms} 값이 약 1000 nm와 46.6 nm까지 각각 증가함으로써 1000 nm의 장파장에 대해서도 산란특성이 향상됨을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 증착온도 500°C에서 제조된 Ag 후면반사막을 이용하는 경우 플렉서블 실리콘 박막 태양전지가 빛을 흡수할 수 있는 300 nm - 1100 nm까지의 파장범위에 대하여 효과적으로 입사된 빛을 산란시켜 태양전지 내에서의 빛 가둠(light trapping)을 증대시킴으로써 단락전류밀도(short circuit current density; J_{sc})의 향상을 가져올 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

Fig. 5는 Ag 후면반사막 위에 상온에서 증착된 100 nm 막 두께를 갖는 ZnO:Al 박막의 투과도 및 상온과 500°C에서 제조된 Ag 박막 위에 ZnO:Al 박막을 증착한 ZnO:Al/Ag 이중구조 후면반사막의 반사 특성을 나타낸 것이다. 기관 가열없이 상온에서 증착되었음에도 불구하고 증착된 ZnO:Al 박막은 약 80% 이상의 투과도를 나타내었다(Fig. 5(a)). Four-point probe를 통하여 측정된 면저항값도 약 $2 \times 10^{-3} \Omega/\text{sq}$ 의 비교적 우수한 전기적 특성을 나타내어 후면전극으로 사용시 태양전지 성능에는 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 ZnO:Al/Ag 후면반사막의 반사특성은 ZnO:Al 박막층

Fig. 5. Transmittance, reflectance, absorbance (a) and total and diffused reflectance (b) of ZnO:Al/Ag back reflectors at deposition temperature of 25°C and 500°C.

에서의 반사 및 흡수에 의한 반사도의 감소를 제외하고는 Ag 후면반사막의 반사특성과 유사함을 알 수 있다. 또한 이는 Fig. 3의 AFM 결과에서 보는 것과 같이 ZnO:Al/Ag 후면반사막의 표면형상 및 표면거칠기 변화와도 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5(b)에서 관찰되는 ZnO:Al 박막에 의한 반사 및 흡수는 실제 태양전지 내에서는 크게 고려하지 않아도 될 것으로 생각된다. 이는 현재 반사도 측정이 공기 중에서 이루어졌으며 실리콘 광 흡수층의 굴절률이 ZnO:Al 박막의 굴절률보다 크기 때문에 ZnO:Al 박막에 의한 반사 및 흡수가 실제로는 크게 발생하지 않기 때문이다.¹⁸⁾ ZnO:Al/Ag 이중구조 후면반사막의 표면형상 및 표면거칠기 변화와 이에 따른 반사특성 변화가 실리콘 박막 태양전지 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1의 구조를 갖는 비정질 실리콘 박막 태양전지를 증착온도 25°C 및 500°C에서 증착된 ZnO:Al/Ag 후면반사막 위에 제조하였다. Fig. 6은 ZnO:Al/Ag 후면반사막 위에 제조된 실리콘 박막 태양전지의 표면형상을 나타낸 SEM 사진 결과이다. 증착온도 500°C의 후면반사막 위의 실리콘 박막 태양전지 표면은 25°C에서 증착된 후면반사막 위의 실리콘 박막 태양전지 표면에 비하여 상당히 거친 표면형상을 나타낸다. 이는 후면반사막의 표면형상을 따라 실리콘 박막층과 전면전극인 ITO층이 균일하게 증착되었음을 나타낸다. Substrate구조의 nip 실리콘 박막 태양전지의 경우는 태양 빛이 전면전극쪽으로 입사됨으로 증착온도 500°C의 후면반사막 위에 제조된 실리콘 박막 태양전지의 거친 표면은 전면전극쪽에서의 빛의 산란을 일으켜 평탄한 표면의 태양전지보다 추가적인 빛 산란효과를 가져올 수 있어 태양전지 내의 빛 가둠을 더욱 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 7은 평탄하고 거칠은 서로 다른 표면형상을 갖는 후면반사막 위에 제조된 비정질 실리콘 박막 태양전지의 Photo I-V 그래프이며 이로부터 측정된 태양전지의 개방전압(open circuit voltage; V_{oc}), 단락전류밀도(short circuit current density; J_{sc}), 충전율(fill factor; FF) 및 변환효율

Fig. 7. Photo I-V curves of flexible silicon thin film solar cells prepared on the ZnO:Al/Ag back reflectors with flat and rough Ag surfaces; (a) flat surface and (b) rough surface.

Table 1. Performance of flexible silicon thin film solar cells fabricated on the flat and rough ZnO:Al/Ag back reflectors.

	V_{oc} (V)	FF	J_{sc} (mA/cm ²)	η (%)
Flat Ag surface (at 25°C)	0.92	0.60	9.94	5.59
Rough Ag surface (at 500°C)	0.93	0.61	13.36	7.60

(conversion efficiency; η)을 Table 1에 나타내었다. 측정 결과에서 알 수 있듯이 후면반사막의 표면형상에 따라 태양전지의 V_{oc} 및 FF에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며 거친 표면형상의 후면반사막을 갖는 태양전지의 J_{sc} 값만 평탄한 표면을 갖는 후면반사막에 비하여 크게 증가함을 알 수 있다. 이러한 J_{sc} 값의 증가는 입사광의 후면반사막과 전면전극에서의 산란특성 향상에 따른 태

Fig. 6. Surface features of silicon thin film solar cells fabricated on the ZnO:Al/Ag back reflectors with flat and rough Ag surfaces; (a) flat surface and (b) rough surface.

양전지내의 산란 빛의 이동경로 증가와 그에 따른 흡수도 향상에 의한 것으로 생각된다. 현재까지 제조된 플렉서블 비정질 실리콘 박막 태양전지는 V_{oc} 0.93 V, J_{sc} 13.36 mA/cm², FF 0.61로써 약 7.60%의 변환효율을 나타내었다. 태양전지 효율의 추가적인 향상을 위한 광흡수층 및 계면특성, 전극물성 개선 등이 향후 추가적으로 이루어질 예정이다.

4. 결 론

플렉서블 스테인레스 스틸 기판 위에 DC 마그네트론 스퍼터링법을 이용하여 실리콘 박막 태양전지용 ZnO:Al/Ag 후면반사막을 제조하고 Ag 박막의 표면 텍스처링에 따른 후면반사막의 광학적 특성 변화 및 태양전지 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 증착온도를 25°C에서 500°C로 증가시키기에 따라 Ag 박막내의 입자크기는 100 nm에서 1000 nm까지 성장하였으며 이에 따라 표면형상의 불균일성이 증대되고 표면거칠기도 6.6 nm에서 46.6 nm까지 증가하였다. 증착온도에 따른 이러한 Ag 입자크기의 성장 및 표면형상 변화는 Structure Zone Model (SZM)을 통하여 설명되었다. Ag 원자의 실리콘 박막내로의 확산방지 및 반사도 향상을 위하여 증착한 100 nm 두께의 ZnO:Al 박막 증착 후에도 ZnO:Al/Ag 후면반사막의 표면 텍스처링은 Ag 박막의 표면 텍스처링과 거의 유사한 결과를 나타내어 ZnO:Al 박막이 Ag 박막 표면을 따라 균일하게 증착되었음을 알 수 있었다. 표면 텍스처링에 따른 후면반사막의 총 반사도에는 큰 변화가 없는 반면에 증착온도가 증가함에 따라 입자가 크고 불균일한 분포를 갖는 거친 표면 위에서의 확산 반사도가 크게 증가되었으며 특히 증착온도 500°C에서 제조된 후면반사막에서는 단파장 및 가시광 영역 뿐만 아니라 800 nm 이상의 장파장에 대한 확산 반사특성도 크게 향상되었다. 서로 다른 표면 텍스처링 특성을 갖는 후면반사막 위에 비정질 실리콘 박막 태양전지를 제조한 결과 거친 표면 형상과 큰 표면 거칠기 값을 갖고 높은 확산 반사도를 나타내는 후면반사막 위에서 J_{sc} 값이 증가되었으며 이는 후면반사막에서의 Haze값 증대에 따른 태양전지 내에서의 입사광의 이동경로 증가와 이를 통한 광 포획 특성 향상에 의한 것으로 생각된다. 본 연구를 통하여 제조된 플렉서블 비정질 실리콘 박막 태양전지는 7.60% (V_{oc} =0.93, J_{sc} =13.36 mA/cm², FF=61%) 의 변환효율을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 신재생에너지기술개발사업 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2009T100100241).

참 고 문 헌

1. J. Yang, A. Banerjee and S. Guha, Appl. Phys. Lett., **70**, 2975 (1997).
2. J. K. Rath, M. Brinza, Y. Liu, A. Borreman and R.E.I. Schropp, Sol. Energ. Mater. Sol. Cell., **94**, 1534 (2010).
3. M. Pagliaro, R. Ciriminna and G. Palmisano, Flexible Solar Cells, p.1~5, Willey-Vch GmbH & Co, Weinheim (2008).
4. F. J. Haug, T. Söderström, M. Python, V. T. Daudrix, X. Niquille and C. Ballif, Sol. Energ. Mater. Sol. Cell., **93**, 884 (2009).
5. A. Poruba, A. Fejfar, Z. Remes, J. Springer, M. Vanecek, J. Kocka, J. Meier, P. Torres and A. Shah, J. Appl. Phys., **88**, 148 (2000).
6. Y. J. Kim, J. S. Cho, J. C. Lee, J. S. Wang, J. S. Song and K. H. Yoon, Kor. J. Mater. Res., **19**(5), 245 (2009) (in Korean).
7. C. Heine and R. H. Morf, Appl. Optic., **34**, 2476 (1995).
8. H. Stiebig, C. Haase, C. Zahren, B. Rech and N. Senoussaoui, J. Non-Cryst. Solids, **352**, 1949 (2006).
9. D. Zhou and R. Biswas, J. Appl. Phys., **103**, 093102 (2008).
10. J. A. Thornton Annu. Rev. Mater. Sci., **7**, 239 (1977).
11. C. R. M. Grovenor, H. T. G. Hentzell and D. A. Smith, Acta Metall., **32**, 773 (1984).
12. D. A. Smith and A. Ibrahim, Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **317**, 401 (1994).
13. J. A. Thornton, J. Vac. Sci. Technol., A **4**, 3059 (1986).
14. I. Petrov, P. B. Barna, L. Hultman and J. E. Greene, J. Vac. Sci. Technol., A **21**, S117 (2003).
15. A. Banerjee and S. Guha, J. Appl. Phys., **69**, 1030 (1991).
16. A. Liebsch, Phys. Rev. Lett., **71**, 145 (1993).
17. T. Söderström, F. J. Haug, X. Niquille, V. Terrazzoni and C. Ballif, Appl. Phys. Lett., **94**, 063501 (2009).
18. J. Escarré, F. Villar, J. M. Asensi, J. Bertomeu and J. Andreu, J. Non-Cryst. Solids, **352**, 1896 (2006).